

Conception optique de **télémetros laser** astronomiques de portée indicative = Terre-Lune, *G. Martinot-Lagarde (OCA/Géoazur)*

Cours du 27 novembre 2013 – Master II Optique et **IMAG2E** (Imagerie et Modélisation Astrophysique Géophysique, Espace et Environnement)

Module M2S1 = Etudes de Cas industriels et Recherche :

- Gestion et exploitation des données spatiales (6h.) S. Matthieu ([Thales Alenia Space](#))



- télémetros astronomiques (6 h.) :

Cette revue sur les applications de la **téléométrie laser sur terre** (sismologie, anémométrie...) **et satellitaire** (océanographie, **géodésie**, mouvement des plaques tectoniques, **missions astronomiques**...) est enrichie par des éléments en recherche et développement en **technologie des lasers** et des lidars...).

- Imagerie pour la détection et le suivi des cancers (20h.) H. Beaumont (site : mediantechnologies.com)

- Modélisation et analyse de la fracturation des roches : explosions (20h.) T. Bernard

(société TBT ingénierie explosive site : tbtech.fr)

- Instrumentation en sismologie (12h.) R. Pillet ([OCA / Géoazur](#))

- Gaia: science, conception, organisation d'une mission spatiale (12h.) P. Tanga ([OCA / Lagrange](#))

laser = « Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation »

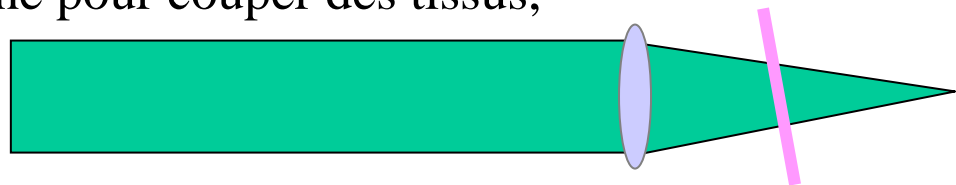
- => Laser = lumière monochromatique = couleur unique = longueur d'onde précise :
- Lasers UltraViolet (UV) :] ~ 200 nm ; 400 nm]
 - Lasers visibles : [400 nm ; 700 nm] = 2% du spectre
 - Lasers Infra Rouges (IR) de [700 nm ; ~ 13000 nm [

La lumière dite « blanche » est une combinaison de couleurs différentes.

=> Laser = lumière cohérente donc capable de former un faisceau très fin qui peut converger en un faisceau très étroit (de quelques μm^2),

=> elle peut posséder un flux énergétique très puissant par unité de surface, capable de couper le métal (ou de le souder).

=> par leur capacité d'agir à distance et sans apport microbien, les lasers sont aussi utilisés en médecine pour couper des tissus, obturer une incision...



Le laser = outil utile, mais
dangereux pour l'œil et la peau



Classe 1: Lasers intrinsèquement sans danger (pour CD, DVD).



Classe 2: Lasers à rayonnement « visible » de puissance ≤ 1 mW
(fenêtre visible = longueur d'onde de 400 à 700 nm)
=> Protection de l'œil assurée par le réflexe palpébral.

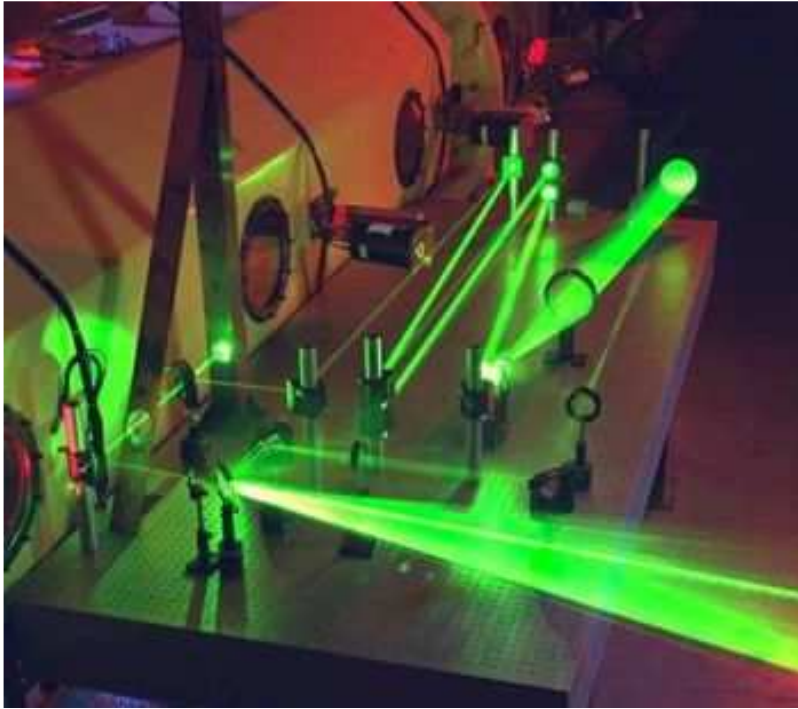
pointeurs lasers

Classe 3a: Lasers de puissance moyenne (< 5 mW).

Vision directe dangereuse si elle est supérieure à 0,25 s
+ Vision dangereuse à travers un instrument d'optique.

Class 3b: Lasers [5; 500 mW] dont la vision directe est toujours
dangereuse pour un faisceau direct ou une réflexion spéculaire
=> Nécessité de lunettes de protection + précautions expérimentales

Classe 4: Lasers toujours dangereux en vision directe ou diffuse,
créant des lésions cutanées et oculaires (>500 mW). Ils constituent un
danger pour l'œil et la peau et peuvent entraîner des incendies.



la lumière visible
quitte la table

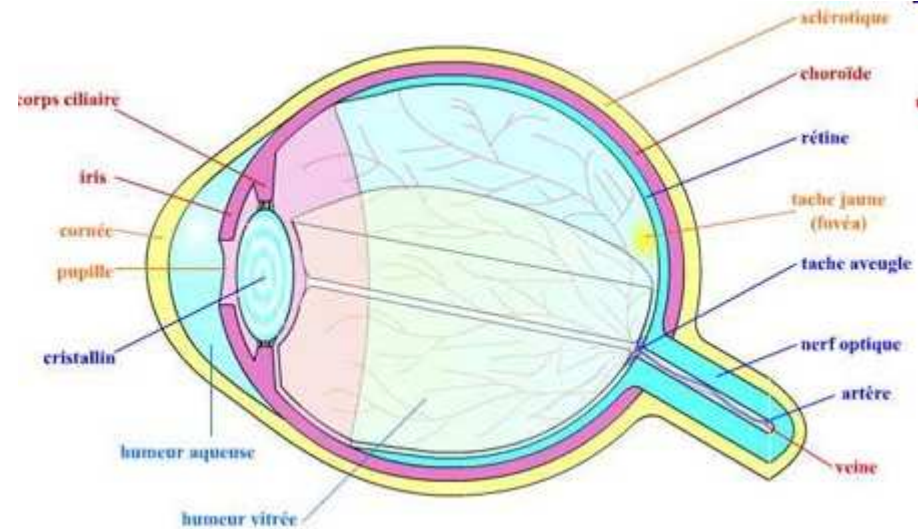


précautions
expérimentales



L'œil du laseriste est spécialement éprouvé dans les **laboratoires sombres** où les lasers sont souvent utilisés :

- ⇒ **pupille dilatée**
- ⇒ **vision scotopique**



On appelle **vision scotopique** (du grec skotos, obscurité), la « forme » particulière que prend la vision dans des conditions de faible éclairage. Chez l'homme, la vision scotopique est essentiellement assurée par les bâtonnets de la rétine, qui possèdent une sensibilité à la lumière importante (due à la rhodopsine) mais répondent à toutes les longueurs d'onde visibles (donnant ainsi une perception en noir-et-blanc, ou panchromatique).

Le maximum de sensibilité est atteint, chez l'homme, après environ 45 minutes de séjour dans l'obscurité, ce qui correspond au temps nécessaire pour régénérer toutes les molécules de rhodopsine sous leur forme active. En raison de la répartition des bâtonnets sur la rétine, le maximum de sensibilité ne se situe pas dans l'axe optique (la fovéa étant constituée uniquement de cônes) mais à quelques degrés de celui-ci.

Efficacité lumineuse relative en vision **photopique** (diurne)

λ (nm)	$v(\lambda)$	λ (nm)	$v(\lambda)$	λ (nm)	$v(\lambda)$	λ (nm)	$v(\lambda)$
400	0,000 4	500	0,323	600	0,631	700	0,004 1
410	0,001 2	510	0,503	610	0,503	710	0,002 1
420	0,004 0	520	0,710	620	0,381	720	0,001 05
430	0,011 6	530	0,862	630	0,265	730	0,000 52
440	0,023	540	0,954	640	0,175	740	0,000 25
450	0,038	550	0,995	650	0,107	750	0,000 12
460	0,060	560	0,995	660	0,061	760	0,000 06
470	0,091	570	0,952	670	0,032	770	0,000 03
480	0,139	580	0,870	680	0,017	780	0,000 015
490	0,208	590	0,757	690	0,008 2		

Efficacité lumineuse relative en vision **scotopique** (crépusculaire)

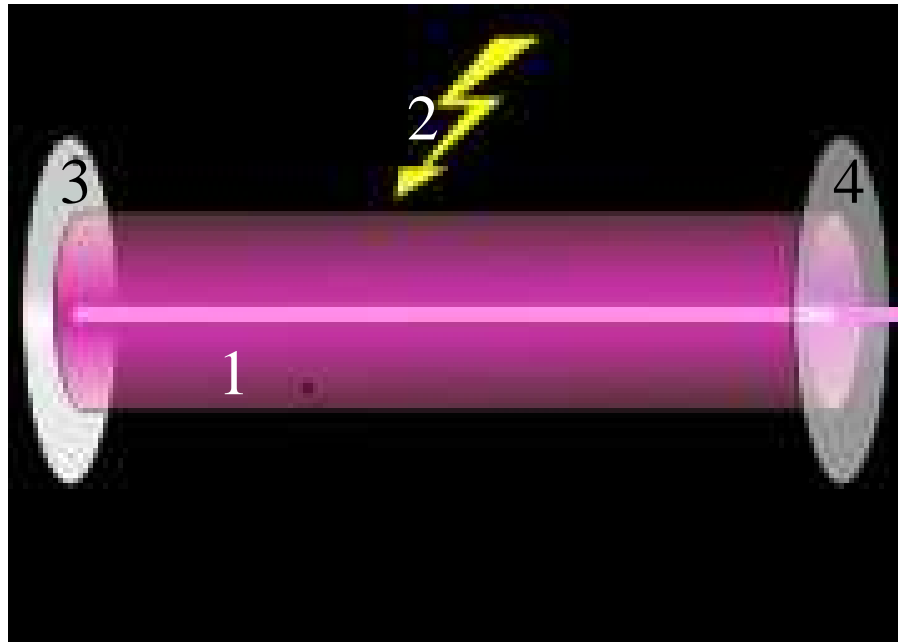
λ (nm)	$v(\lambda)$	λ (nm)	$v'(\lambda)$	λ (nm)	$v'(\lambda)$	λ (nm)	$v'(\lambda)$
		400	0,009 29	500	0,982	600	0,033 15
		410	0,034 84	510	0,997	610	0,015 93
		420	0,096 6	520	0,935	620	0,007 37
		430	0,199 8	530	0,811	630	0,003 335
		440	0,328 1	540	0,650	640	0,001 497
		450	0,455	550	0,481	650	0,000 677
		460	0,567	560	0,328 8	660	0,000 312 9
		470	0,676	570	0,207 6	670	0,000 148 0
		480	0,793	580	0,121 2	680	0,000 071 5
		490	0,904	590	0,065 5	690	0,000 035 33
380	0,000 589						
390	0,002 209						

⇒ dans l'obscurité, l'œil est plus sensible aux objets bleus, mais il les « perçoit » en noir et blanc...

Contexte historique du laser : le laser continu

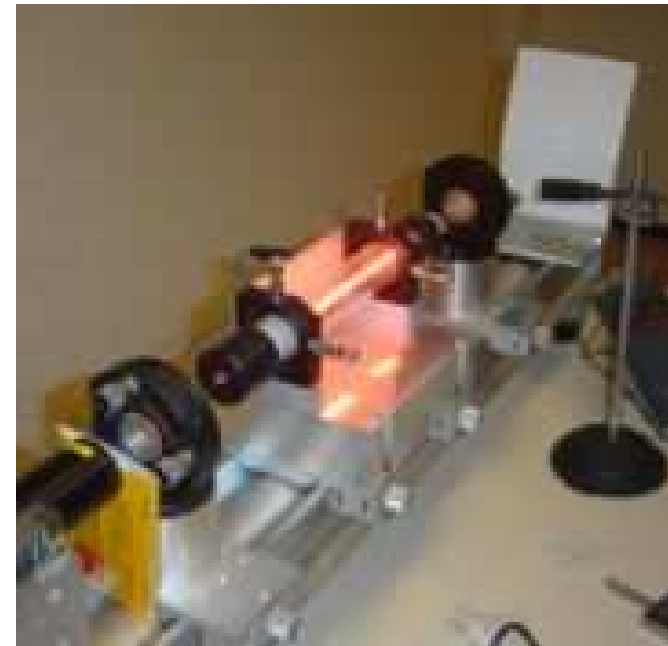
Émission stimulée, Albert Einstein (1917)

+



Pompage optique,
Alfred Kastler (1950)

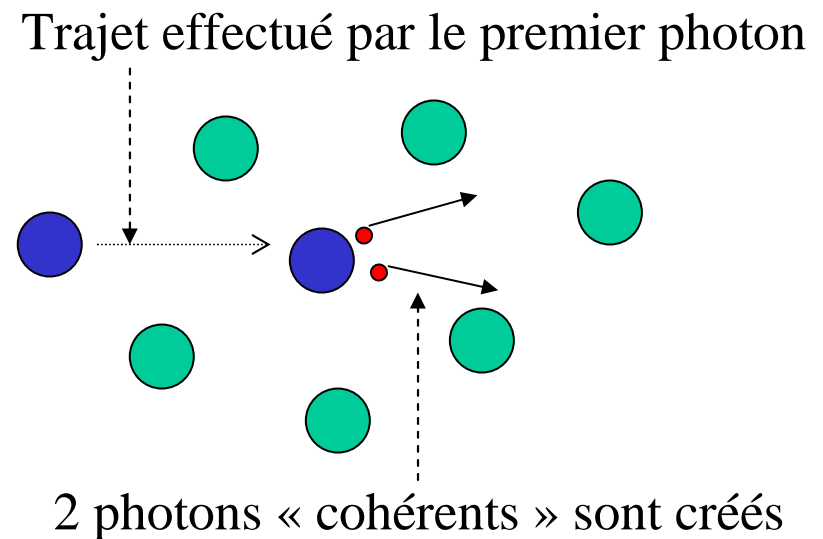
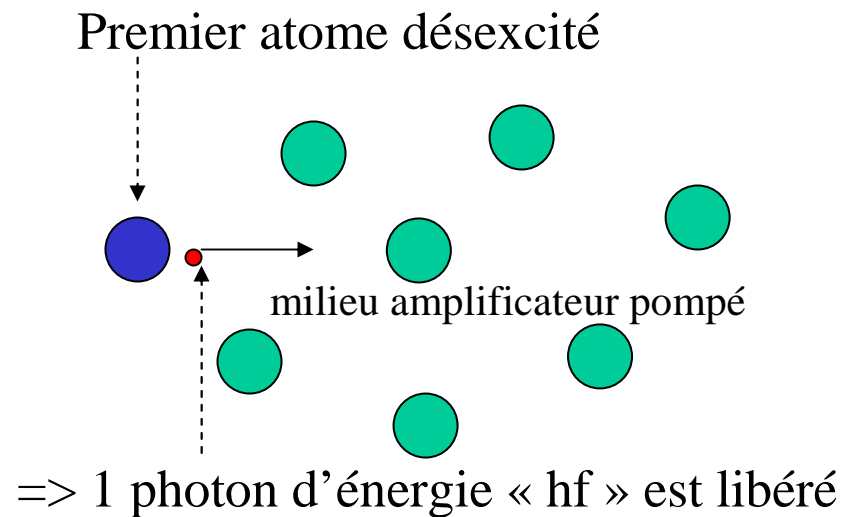
- 1 = milieu excitable
- 2 = énergie de pompage
- 3 = miroir totalement réfléchissant
- 4 = miroir semi-réfléchissant
- 5 = faisceau laser



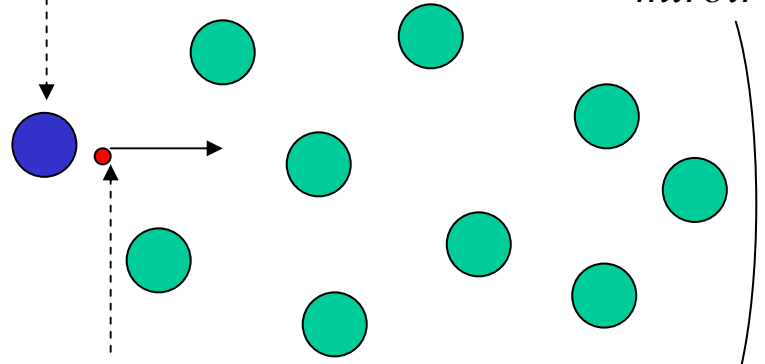
Notion de mise en cohérence des photons produisant l'effet laser

Analogie au phénomène de résonance mécanique :

- à la balançoire, le petit balancement répété et « aux bons moments » des jambes génère la création d'un mouvement de balancier significatif
- à contrario, les militaires rompent le pas en passant sur les ponts pour éviter de risquer l'écroulement de l'édifice...

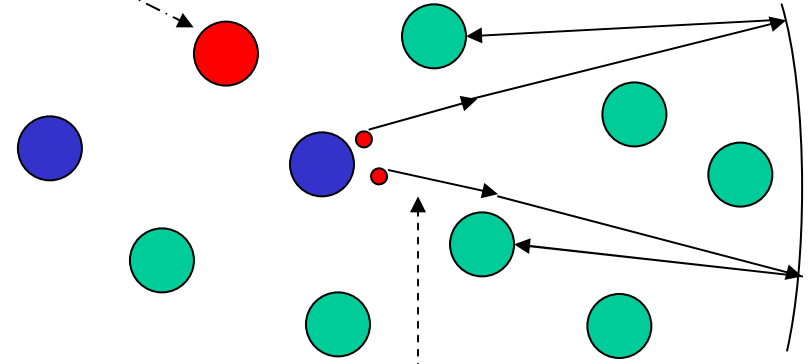


premier atome désexcité

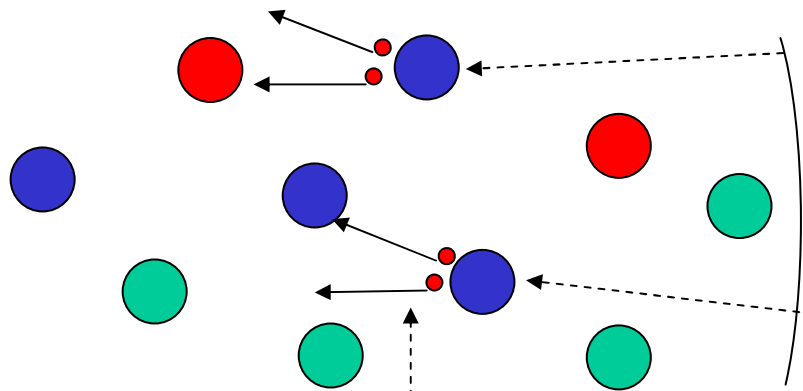


=> 1 photon d'énergie « hf » est libéré

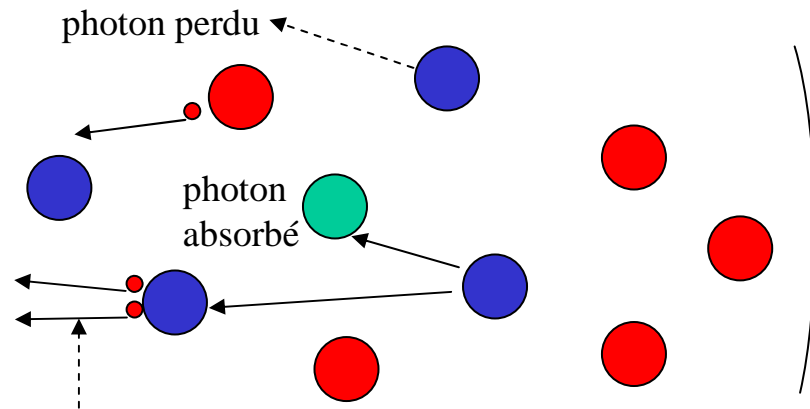
désexcitation non-radiative par vibrations thermiques



2 photons « cohérents » sont créés



4 photons « cohérents » sont créés

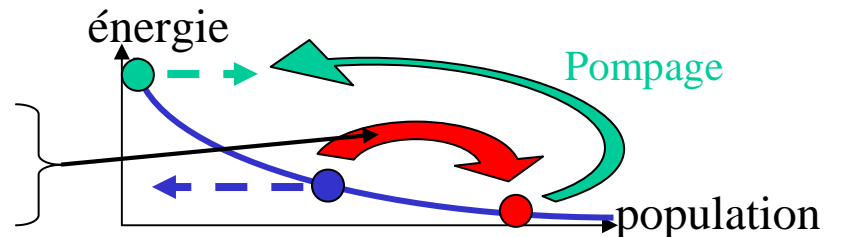


Seuls 3 photons « cohérents » survivent dans ce milieu passablement désexcité

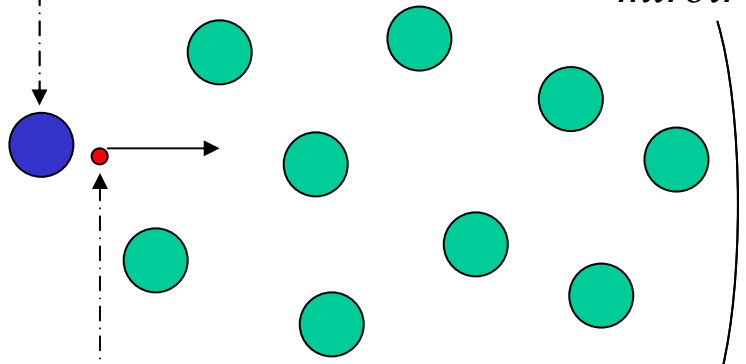
=> **Inversion de population** désirée :

⇔ état haut plus peuplé que l'état intermédiaire

Astuce : utiliser un matériau actif à 3 niveaux...

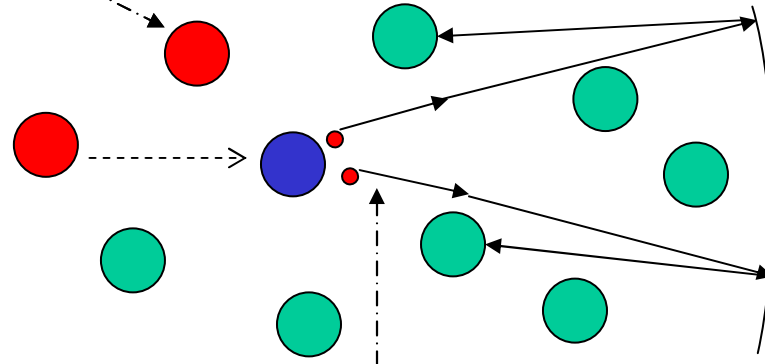


premier atome désexcité



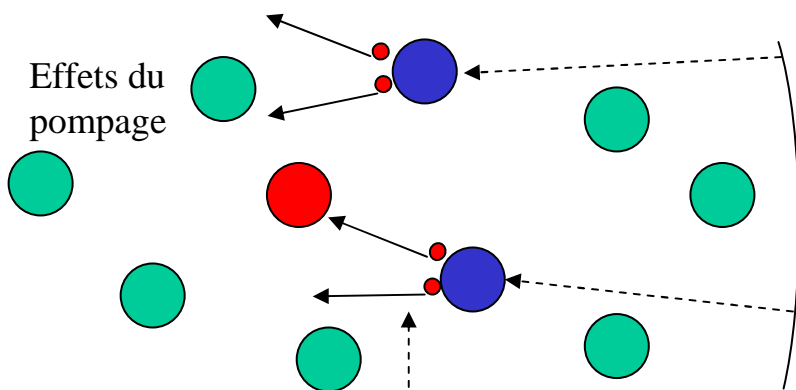
=> 1 photon d'énergie « hf » est libéré

désexcitation non-radiative par vibrations thermiques



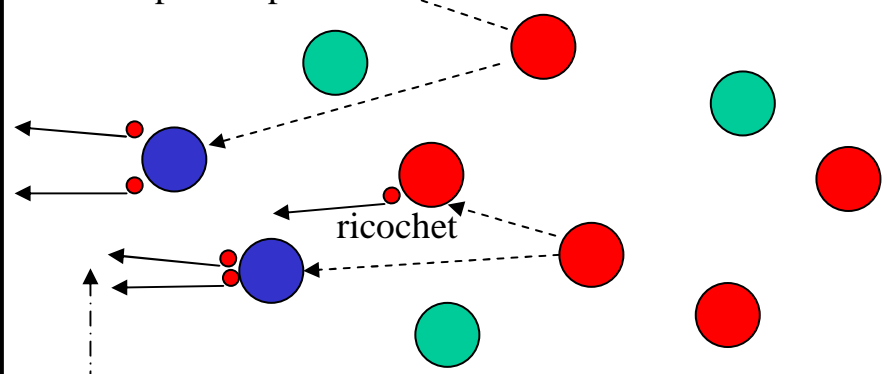
2 photons « cohérents » sont créés

Effets du pompage



4 photons « cohérents » sont créés

photon perdu

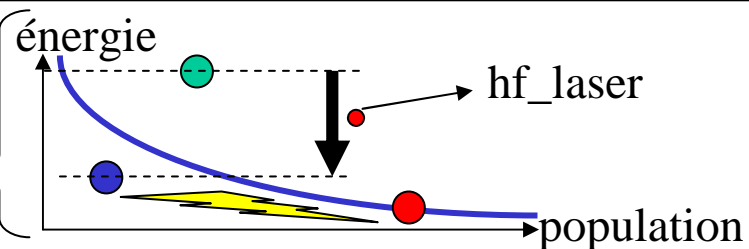


5 photons « cohérents » continuent leur course en développant l'effet laser...

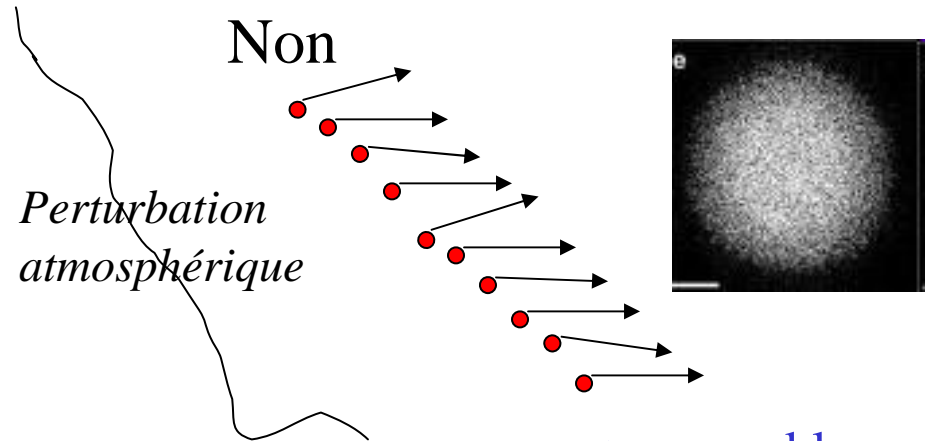
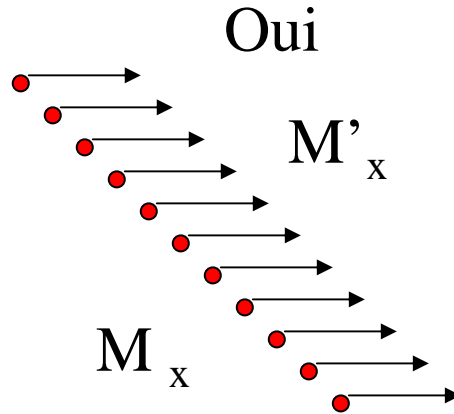
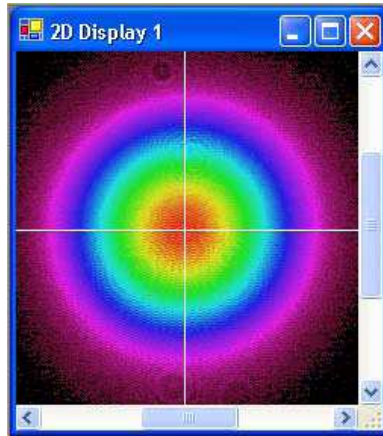
=> **Inversion de population** illustrée à 3 états :

↔ **état haut** plus peuplé que l'**état intermédiaire**

si **sa** transition vers l'**état fondamental** est **rapide** ⚡



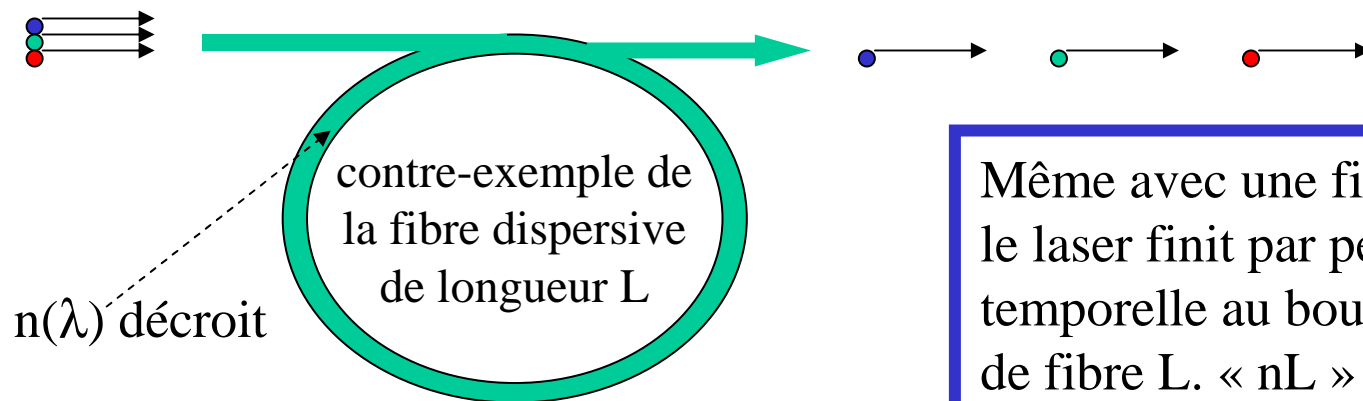
Cohérence spatiale : à t donné, $\Phi(M') = \text{fonction_simple}[\Phi(M)]$



=> « speckles »
en photométrie

http://www.ophiropt.com/user_files/laser/beamprofilers/beamstar_fx_110_user_manual.pdf

Cohérence temporelle : quand $\Phi_{\text{front}}(t') = \Phi_{\text{front}}(t) + 2\pi nL / \lambda$



Même avec une fibre non dispersive, le laser finit par perdre sa cohérence temporelle au bout d'une longueur de fibre L. « nL » est alors appelée la « longueur de cohérence du laser ».

=> Pertes de contraste en interférométrie

Impulsion du photon \Leftrightarrow Pression de radiation = $\int_S \epsilon(E_i \wedge B_i - E \wedge B) c_{sca} \cdot ds$

impulsion du photon = $\hbar \mathbf{k}$ = « h_barre » \mathbf{k}

où \mathbf{k} est le vecteur de propagation de l'onde de module $2\pi / \lambda$

(\Rightarrow Module de cette impulsion = $h / \lambda = h f / c = \text{énergie} / c$)

« Explications » de cette action de la lumière sur la matière :

La matière ($n > 1$) va vers les zones de lumière dense

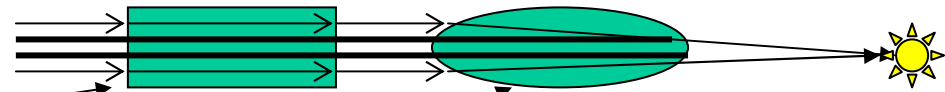
\vec{E} champ électrique
 \vec{B} champ magnétique
 c célérité (m/s)
 λ longueur d'onde (m)
 T période = λ / c (s)
 f fréquence = $1 / T$ (Hz)

- $F = m \, dv / dt$
- $F = q \vec{E} + q \mathbf{v} \wedge \vec{B}$

\Rightarrow Entraînement de \oplus

Cas de **cohérences spatiales** et **temporelles** exceptionnelles

- les expériences de lasers intenses « de type Laser Mégajoule... » où le profil spatial est potentiellement mesuré et corrigé entre chaque tir avec un système de miroirs déformable corrigeant le front d'onde, pour empêcher les débuts de points chaud de se renforcer au tir suivant par auto-focalisation d'origines thermique ou par effet Kerr optique (où l'indice de réfraction varie linéairement avec l'intensité lumineuse)



Barreau à indice homogène \neq barreau à indice maximal au centre

- **L'interférométrie** et en particulier la détection d'ondes gravitationnelles Virgo

Vu du haut, on peut le décrire comme un grand L dont les "bras" font 3 km de long chacun ; les tubes à vides ont un diamètre de 120 cm. Dans le but d'augmenter la longueur de ces bras, on utilise deux cavités de type Fabry-Perot dans chaque bras, qui peuvent allonger le trajet des particules jusqu'à 120 km. La puissance du laser est de 20 W.

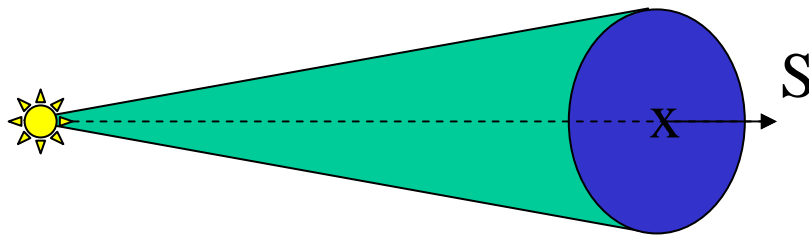
Virgo est sensible aux variations gravitationnelles dans un domaine de fréquences allant de 10 à 10 000 hertz.



Mesure de la lumière en photométrie visuelle

Depuis le 12 octobre 1979, la **candela** est définie de la façon suivante :

La candela est « l'intensité lumineuse » d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence 540×10^{12} hertz (correspondant à une longueur d'onde dans le vide de 555 nm) telle que puissance lumineuse émise dans son cône d'émission vaut $(1 / 683)$ Watt par stéradian $\Rightarrow 1 \text{ cd} \sim 1,46 \text{ mW} / \text{sr}$



$$1 \text{ lx} = 1 \text{ cd} \times 1 \text{ sr} / 1 \text{ m}^2$$

$$1 \text{ lx} = 1 \text{ lm} / 1 \text{ m}^2$$

où sr = unité d'angle solide,

lx = unité de Lux = éclairement perçu,

et où lm = lumen = puissance perçue.

- sensibilité d'une caméra bas niveau : 0,001 lux
- nuit de pleine lune : 0,5 lux
- rue de nuit bien éclairée : 20 - 70 lux
- local de vie : 100 – 200 lux
- appartement bien éclairé : 200 - 400 lux
- local de travail : 200 - 3 000 lux
- stade de nuit : 1 500 lux
- extérieur par ciel couvert : 25 000 lux
- extérieur en plein soleil : 50 000 à 100 000 lux

- rues, routes et autoroutes : 15 à 50 lux
- activité intermittente ou tâche simple : 125 lux
- mécanique moyenne, travail de bureau : 200 lux
- mécanique fine, dessins : 400 lux
- mécanique de précision, électronique : 600 lux
- tâches difficiles, laboratoires : 800 lux
- *la perception oculaire d'une chandelle à 1 m est 1 lx*

Mesures d'éclairement pour les lasers

L'onde laser pouvant être focalisée bien davantage car sa cohérence lui permet d'atteindre la limite de diffraction ($\varnothing_{\text{foyer}} = 2,44 \lambda f / D_{\text{laser}}$)
Il est donc formellement déconseillé d'utiliser l'œil comme capteur.
⇒ On se dirige naturellement vers des mesures en W/cm^2 ou J/cm^2

⇒ Comme toute lumière, le laser est une onde électromagnétique dont l'« intensité » que l'on devrait nommer plutôt « éclairement » (en W/cm^2) est définie comme la valeur moyenne du flux de l'énergie lumineuse par unité de surface :

$$\Rightarrow \vec{I} = \text{Densité_Energie} \times \vec{c}$$

$$\text{Densité_Energie_onde_progressive} = \frac{1}{2} \epsilon E^2 + \frac{1}{2} \mu H^2 \quad \Rightarrow \quad I_{\text{laser}} = c \epsilon \langle E^2 \rangle$$

$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r = \text{permittivité} = \epsilon_r \times 8,85 \text{ pC}/(\text{Vm})$; $E = \text{champ électrique en V/m}$;
 $\mu = \mu_0 \mu_r = \text{perméabilité magnétique}$; $H = \text{excitation magnétique}$;

PS : $I = \text{module moyen du vecteur de poynting} = |E \wedge H| = |E \wedge B / \mu|$

Rappels de grandeurs et unités complémentaires

Vitesse de la lumière dans le vide : $c_{\text{vide}} = 2,998.10^8 \text{ m/s}$

Indice de réfraction d'un milieu : $n = c_{\text{vide}} / c$

$$\epsilon_0 \mu_0 c_{\text{vide}}^2 = 1 \text{ et } \epsilon \mu c^2 = 1 \Rightarrow n^2 = c_{\text{vide}}^2 / c^2 = \epsilon_r \mu_r$$

Energie d'un photon: $E = h f = h c / \lambda$

Constante de Planck: $h = 6,629 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$

Puissance d'un signal optique: $P(\text{dBm}) = 10 \log [P / (1 \text{ mW})]$

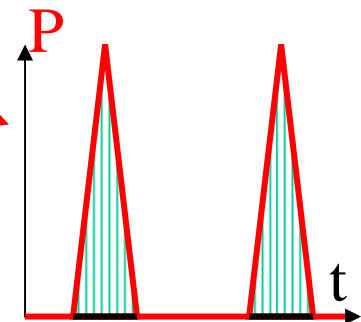
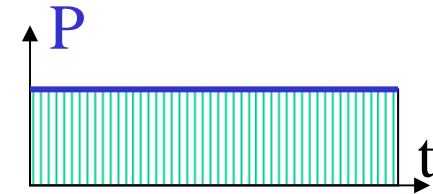
Puissance de rayonnement: **Puissance « instantanée »
de l'enveloppe des ondes :**

- **P** est constante à quelques % près pour les lasers continus
- **P** varie de 0 à des valeurs comme le GW en impulsionnel

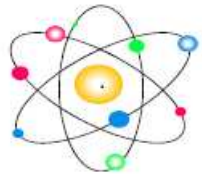
Energie de rayonnement = Energie d'une seule impulsion

Intensité (ou éclaircement) = **Puissance** par unité de surface

Exposition énergétique = énergie de l'impulsion par unité de surface



Lasers + physique nucléaire (fusion) pour $I > 10^{23} \text{ W/cm}^2$



Champs intra-atomiques (couches externes) = **5 GV / cm**

- **Dangerosité** (onde laser sur l'axe d'un faisceau gaussien d'impulsions de **10 μJ** en forme de porte temporelle de **100 fs**)

~ **0,1 x Dangerosité** (*Lunar Laser Ranging* à **100 mJ** et **100 ps**)

- Calcul de l'éclairement **I** au col (« beamwaist ») de diamètre = $10 \mu\text{m}$:

$$I = 10 \mu\text{J} / [100 \text{ fs} \times \pi (10 \mu\text{m})^2 / 8] = 2,5 \cdot 10^{14} \text{ W/cm}^2 \ll 10^{23} \text{ W/cm}^2$$

$$\Rightarrow \langle \mathbf{E} \rangle = [I / (\epsilon c)]^{0,5} \sim \mathbf{0,3 \text{ GV/cm}} < 5 \text{ GV/cm} \text{ peu intrusif /matière.}$$

- *Extreme Light Infrastructure* (**ELI**) : laser Exawatt = $1000 \text{ MJ} / \text{ns}$:

$$\Rightarrow \text{compression} \sim 500 \text{ MJ} / [0,2 \text{ fs} \times (10 \mu\text{m})^2] \sim 10^{30} \text{ W/cm}^2$$

\Rightarrow **champ magnétique primordial** généré par l'onde de choc optique,

\Rightarrow création possible d'une **paire électron-positon** à partir **du vide...**